ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Д.Ю. Герасимов, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Р.Р. Шарипов, С.И. Привезенцев

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: SivkovAA@mail.ru

Показана возможность управления величиной электроэрозионного износа поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя и наработки рабочего материала, для нанесения покрытий. Управление производилось за счет изменения проникания внешнего аксиального магнитного поля во внутрь ускорительного канала. При этом динамические параметры импульсной плазменной струи на срезе ствола ускорителя остаются практически без изменения.

В гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе (КМПУ), рис. 1, использование внешней индукционной системы (индукционной электродинамики) обеспечивает повышение динамических параметров и эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемой массы [1]. В основном это обусловлено повышением пространственно-временной стабильности устойчивого состояния плазменной структуры (ПС) сильноточного разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой за счет дополнительного сжатия аксиальным полем соленоида внешней индукционной системы, повышения плотности тока и, следовательно, увеличения силы Лоренца и эффективности ее работы в коаксиальной магнитоплазменной системе, аналогичной коаксиальному рельсотрону [2]. КМПУ относится к типу эрозионных ускорителей плазмы и является основой разрабатываемой технологии нанесения покрытий [3, 4], посредством воздействия на поверхность подложки гиперзвуковой струи плотной электроэрозионной плазмы. В работах [5, 6] показано, что величина удельного интегрального электроэрозионного износа $\Delta m/W$ (Δm – эродированная масса, W – подведенная к ускорителю энергия) пропорциональна величине удельной подведенной энергии W/V (V – объем ускорительного канала).

Вполне оправдано предположить, что величина аксиального внешнего магнитного поля (ВМП), проникающего в ускорительный канал (УК) в зависимости от степени его экранирования цилиндрической металлической стенкой ствола, должна оказывать влияние не только на динамические характеристики плазменного течения, но и на электроэрозионный процесс на поверхности УК в силу изменяющейся плотности тока в ПС и особенностей ее динамики [7].

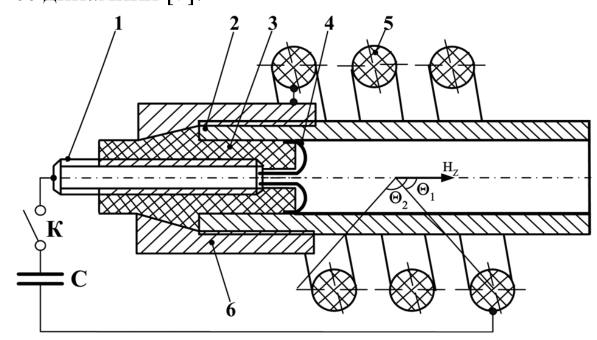


Рис. 1. *Конструкция коаксиального магнитоплазменного ускорителя: 1) центральный электрод; 2) электрод-ствол; 3) изолятор центрального электрода; 4) электровзрывающиеся проводники; 5) соленоид; 6) заглушка*

По-сути, рассматриваемая схема представляет собой воздушный трансформатор, в котором первичной обмоткой является соленоид, а вторичной – короткозамкнутый виток стенки ствола, в котором наводится поперечный ток пропорциональный производной импульсного рабочего тока $I(t)$ ускорителя, протекающего по соленоиду. Поэтому, проникающее в УК ВМП представляет собой суперпозицию поля соленоида и поля, наведенного в стенке ствола поперечного тока. Характер изменения и величина этого тока определяются не только параметрами импульса первичного тока, геометрии системы, но и постоянной времени поперечника стенки ствола (короткозамкнутого витка) – τ, шириной, равной длине соленоида.

Экспериментальные исследования проводились в процессе отработки технологии нанесения покрытий состава нержавеющей стали 12Х18Н9Т на металлические поверхности с помощью КМПУ. Степень экранирования менялась за счет изменения диаметра УК d, толщины металлической стенки δ и использования дополнительных трубчатых экранов из меди, латуни Л-62 и дюралюминия АЛ-2. Абсолютное экранирование имитировалось в экспериментах на классическом пинч-ускорителе [2] (без соленоида) с сохранением параметров контура электропитания.

Степень экранирования определялась экспериментально с помощью индукционного датчика, путем регистрации изменения напряженности аксиального магнитного поля от времени $H_z(t)$ на продольной оси системы в отсутствие сильноточного разряда, но при пропускании импульсного тока по соленоиду. На рис. 2 приведены осциллограммы $H_z(t)$ в центре оси Z соленоида: 1 – без экрана, 2 – внутри УК из нержавеющей стали 12Х18Н9Т $D\times d$=29×25 мм, τ=13,7 мкГн/Ом; 3 – из латуни $D\times d$=19×17 мм, τ=15,4 мкГн/Ом; 4 – из нержавеющей стали $D\times d$=31,5×16 мм, τ=67,7 мкГн/Ом; 5 – из меди $D\times d$=24×20 мм, τ=13,7 мкГн/Ом и осциллограмма тока соленоида $I(t)$.

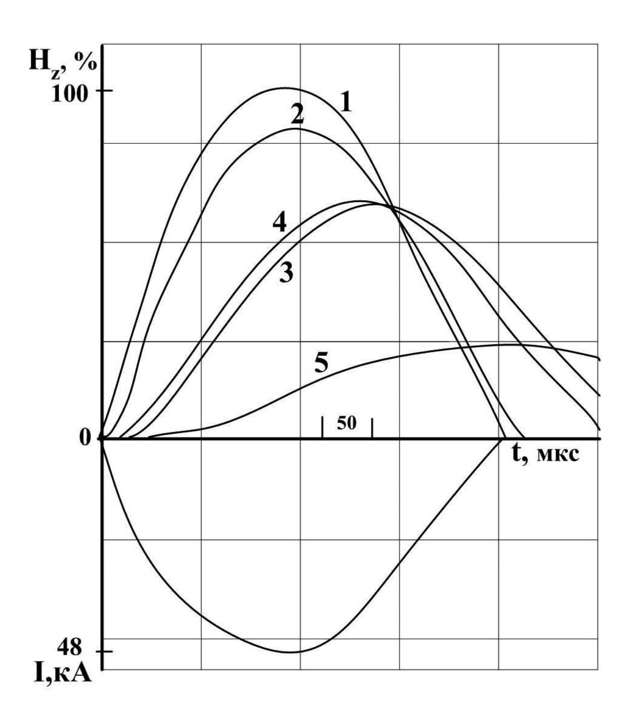


Рис. 2. Осциллограммы напряженности аксиального ВМП и тока соленоида

Из сравнения видно, что с увеличением поперечной проводимости стенки ствола уменьшается H_z, а максимумы кривых смещаются вправо. Аксиальное ВМП в УК толстостенных латунных и медных стволов существует даже после прекращения протекания тока по соленоиду вследствие медленного затухания наведенного в поперечнике ствола (короткозамкнутом витке) тока.

Однако, обращает на себя внимание существенное отличие $H_z(t)$ для стволов с близкими значениями постоянной времени затухания τ, но из разных металлов, например, нержавеющей стали ($D\times d$=29×25 мм) и меди ($D\times d$=24×20 мм). В случае стволов из нержавеющей стали происходит меньшее снижение амплитуды и меньшее смещение максимума кривых вправо.

Аналитически напряженность H_z ВМП определялась по выражению [8]:

$$H_z = \frac{NI}{4\ell_c}\cdot \mathrm{ctg}\frac{P}{\pi a}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \qquad (*)$$

где: N и ℓ_c – число витков и длина соленоида; I – ток соленоида; P – расстояние между витками; α – средний радиус соленоида; θ_1, θ_2 – смежные углы между осью соленоида и прямыми, соединяющими точку определения H_z с концами соленоида (рис. 1). В используемом соленоиде при токе 100 кА, напряженность аксиального магнитного поля в его центре, рассчитанная по выражению (*), составляет H_z=3,44·10^6 А/м.

В качестве критерия, характеризующего степень проникания ВМП соленоида в УК КМПУ, принят коэффициент поля $K_п$, равный:

$$K_п = \int_0^t H_{zi}(t)dt \Big/ \int_0^t H_{z0}(t)dt .$$

где: $H_{zi}(t)$ – аксиальное магнитное поле внутри УК (при наличии экрана); $H_{z0}(t)$ – аксиальное магнитное поле в центре оси Z соленоида без экрана.

Значения $K_п$ определены экспериментально в практически целесообразном диапазоне толщин стенки стволов δ=1...4 мм из нержавеющей стали, меди, дюралюминия, латуни, титана. Экспериментально показано, что изменение амплитуды импульса тока в диапазоне 50...200 кА практически не влияет на величину $K_п$. Полученные данные обобщены в виде экспериментальной зависимости $K_п$ от величины постоянной времени короткозамкнутого витка (поперечника стенки ствола) τ, шириной 1 мм (рис. 3).

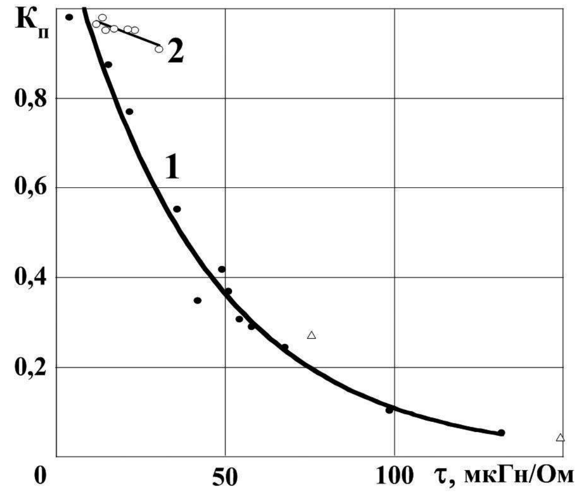


Рис. 3. Зависимость $K_п$ от τ для: 1) нержавеющей стали, 2) титана ВТ1-0, латуни, дюралюминия и меди

В соответствии с отмеченными выше расхождениями характера влияния τ для стволов из нержавеющей стали и других цветных металлов зависимость $K_п(\tau)$ распадается на две ветви. Зависимость 1 соответствует стволам из тонкостенной нержавеющей стали с дополнительными экранами из меди и дюралюминия (Δ), и стволам из титана, латуни, дюралюминия и меди (•). Коэффициент поля $K_п$ для стволов из нержавеющей стали (кривая 2) меняется очень слабо в пределах от 0,90...0,98 в широком диапазоне изменения τ=13,7...30,5 мкГн/Ом, в то время для стволов из титана, латуни, дюралюминия, меди и при использовании стволов из нержавеющей стали с дополнительными экранами из этих металлов в этом же диапазоне изменения τ, $K_п$ меняется от 0,60...0,98. Теоретически при поперечном сопротивлении стремящемся к бесконечности, $K_п$ должен быть близок к единице. Однако экспериментальные кривые не приходят к единице, то есть несколько смещены вправо. Объяснено это может быть тем, что при определении τ использовалось сопротивление металла при нормальных условиях, т.е. не учитывалось его увеличение от нагрева при протекании импульсных токов с плотностью порядка 200...500 А/мм². По-видимому, это же является причиной слабого изменения $K_п$ в случае стволов из нержавеющей стали без дополнительных экранов из меди и дюралюминия. Их удельные сопротивления ρ (Ом·м/мм²) при нормальной температуре (20 °С) составляют: нержавеющая сталь – 0,075...0,1; титан – 0,56; дюралюминий – 0,33 и медь 0,017 [10]. Температурные коэффициенты сопротивления α, град$^{-1}$, для этих металлов равны: $\alpha_{Fe}=6{,}6\cdot10^3$; $\alpha_{Ti}=3{,}3\cdot10^3$; $\alpha_{Al}=4{,}26\cdot10^3$; $\alpha_{Cu}=4{,}33\cdot10^3$ [10]. С учетом этого, а также возможной неравномерности плотности наведенного тока в короткозамкнутом витке, можно сделать предположение о более сильном нагреве стволов из нержавеющей стали по сравнению со стволами из других цветных металлов в соответствии с закономерностью:

$$\rho_t=\rho_{20}{}^{\circ}[1+\alpha(t-20\ ^{\circ}\mathrm{C})].$$

Экспериментальные зависимости $K_п$ от τ (рис. 3) имеют экспоненциальный характер и аппроксимируются выражениями: $K_п=1{,}24\cdot e^{-0{,}021\cdot\tau}$ (кривая 1), $K_п=1{,}003\cdot e^{-0{,}0028\cdot\tau}$ (кривая 2), где: $\tau=L_n/R_n$ – постоянная времени короткозамкнутого витка; L_n – поперечная индуктивность стенки ствола короткозамкнутого витка шириной a=1,0 мм, R_n – поперечное сопротивление витка шириной a=1,0 мм, определяемые по выражениям [9]:

$$L_n=\mu_0\frac{D+d_{ук}}{4}\left(\ln\frac{4(D+d_{ук})}{2a+D-d_{ук}}-0{,}5\right);\ R_n=\frac{\pi\rho}{a}\cdot\frac{D+d_{ук}}{D-d_{ук}}.$$

В таблице приведены данные и средние значения результатов сравнительной серии экспериментов на КМПУ (1) и пинч-ускорителе (2), проведенных в одинаковых условиях: C=48 мФ, $U_{зар}$=3,0 кВ, D=25 мм, d=19 мм. Направление аксиального ВМП совпадало с направлением плазменного течения.

Таблица. *Экспериментальные данные по влиянию ВМП на электроэрозионный износ поверхности УК*

Параметры / № опыта	Ед. изм.	1	2
Коэффициент поля, $K_п$	–	0,954	0
Длина УК, $\ell_{ук}$	мм	272	274
Максимальное напряжение, U_{max}	кВ	1,84	1,78
Максимальный ток, I_{max}	кА	187	193
Подведенная энергия, W	кДж	140,1	134,9
Эродированная масса, Δm	г	24,5	18,3
Объем ускорительного канала, V	мм³	77,08	77,65
Удельная эродированная масса, $\Delta m/W$	г/кДж	0,175	0,136
Удельная подведенная энергия, W/V	кДж/см³	1,79	1,74
Время ускорения головной части, Δt_{1-2}	мкс	68,9	71,3
Скорость на срезе ствола, υ_c	км/с	4,51	4,37

На рис. 4, *а*, приведены эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа поверхности УК по его длине $\Delta m_s(\ell_{ук})$ из нержавеющей стали с различной степенью экранирования УК. Номера эпюр соответствуют номерам экспериментов в таблице. Сравнительный анализ представленных данных показывает значительное уменьшение как дифференциального (Δm_s, г/мм²) (рис. 4), так и интегрального электроэрозионного износа (Δm, г) при отсутствии ВМП (опыт 2, таблица) или при значительном его экранировании дополнительным медным экраном, например, медной трубой, одетой на ствол из нержавеющей стали. При этом волновой характер эпюр сохраняется [3, 4].

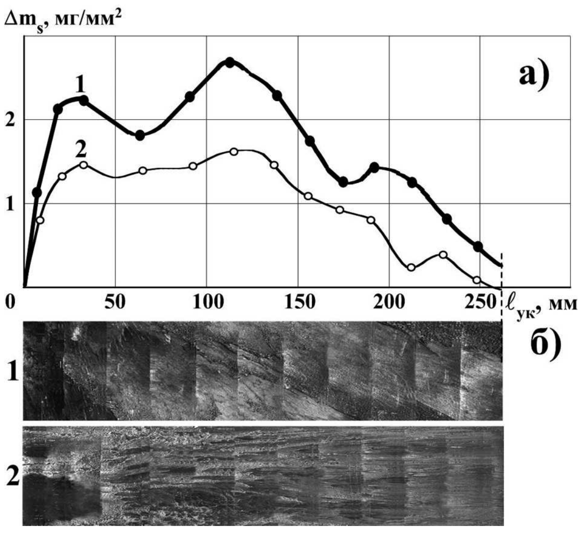


Рис. 4. *Эпюры удельного дифференциального износа по длине УК $\Delta m_s(\ell_{ук})$ (а), фотографии плазменно-эрозионных следов на поверхности УК (б): 1) $K_п$=0,954, 2) $K_п$=0*

Какие же конкретные факторы могут оказывать столь существенное влияние на величину электроэрозионного износа поверхности УК в КМПУ? По-нашему мнению следует выделить два основных фактора: вращение плазмы в УК при наличии ВМП и увеличение плотности тока в дискретных каналах проводимости в ПС. Вращение плазмы в УК при взаимодействии аксиального ВМП и азимутальных полей токов, протекающих по дискрет-

ным каналам видно из сравнения структур плазменно-эрозионных следов на поверхности УК, показанных на фотографиях рис. 4, *б*, номера которых соответствуют номерам опытов в таблице. При отсутствии ВМП (опыт 2) треки плазменно-эрозионных следов практически параллельны продольной оси УК, а при наличии ВМП имеют явный наклон, уменьшающийся по длине УК вследствие увеличения скорости течения.

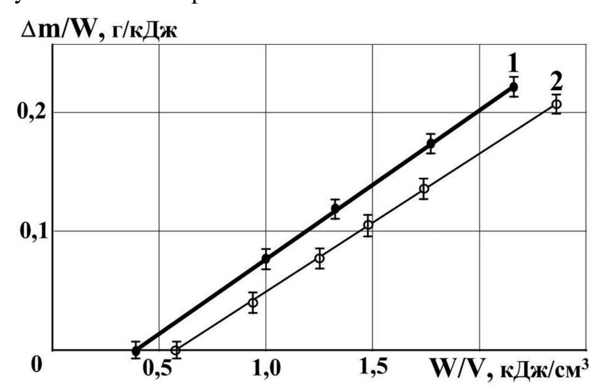


Рис. 5. *Зависимость m/W от W/V: 1)* $K_п$*=0,92...0,98, 2)* $K_п$*=0*

На рис. 5 приведены сравнительные зависимости удельного интегрального электроэрозионного износа m/W от удельной подведенной энергии W/V, для КМПУ со стволами из нержавеющей стали. Их сравнение дает наглядное представление о степени влияния экранирования УК на величину интегрального электроэрозионного износа поверхности УК и величину нарабатываемой массы для нанесения покрытий.

В принятой системе координат они аппроксимируются линейными функциями:

$$\frac{m}{W} = 0,125 \cdot (\frac{W}{V} - 0,390) \text{ (кривая 1)};$$

$$\frac{m}{W} = 0,116 \cdot (\frac{W}{V} - 0,575) \text{ (кривая 2)},$$

рис. 5. Полученные данные позволили записать эмпирическое выражение для стволов из нержавеющей стали с учетом $K_п$:

$$\frac{m}{W} = 0,120 \cdot (\frac{W}{V} + 0,185 \cdot K_n - 0,575).$$

Данное уравнение необходимо для расчета величины удельной эродируемой массы в зависимости от величины коэффициента поля ($K_п$). Экспериментальные данные показывают, что в отсутствии ВМП значительно снижается m/W и столь же значительно увеличивается критическое значение удельной подведенной энергии W_*/V. Это говорит о том, что при отсутствии вращения плазмы и меньшей плотности тока, эрозия поверхности УК начинается при большем значении W_*/V, чем при наличии ВМП.

Представленные результаты показали существенное увеличение электроэрозионного износа поверхности УК при уменьшении степени его экранирования при относительном сохранении динамических параметров плазменной струи, что дает возможность увеличения эффективности использования подведенной энергии на электроэрозионную наработку материала, используемого для нанесения покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивков А.А. Гибридная электромагнитная система метания твердых тел // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 1. – С. 3–12.
2. Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле / Под ред. чл.-корр. АН СССР М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1990. – 350 с.
3. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Obtaining of the aluminium alloy surface by high velocity flux of electro discharge plasma // KORUS-2004: Proc. the 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. – Tomsk, 2004. – P. 298–300.
4. Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С., Сивков А.А. Использование коаксиального магнитоплазменного ускорителя для нанесения медного покрытия на алюминиевую поверхность // Приборы. – 2005. – № 6. – С. 33–40.
5. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Electrical Erosion of the Magnetoplasma Accelerator Channel // 13th Intern. Symp. on High Current Electronics: Proc. Ed. by B. Kovalchuk, G. Remnev. – Institute of HCE Tomsk, 2004. – P. 417–420.
6. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. – 2005. – № 6. – С. 25–33.
7. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Electroerosive production of coating material in a coaxial magnetoplasma accelerator // KORUS-2005: Proc. the 9th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology. – Novosibirsk, 2005. – P. 389–392.
8. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 368 с.
10. Кухлинг К. Справочник по физике. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.